

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AÇÃO DE FUNGOS NA REMOÇÃO DE METAIS DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS E COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS: UMA REVISÃO

* Nathália Araújo Magalhães ¹
Milena Kelly Justino Vieira ²
Glória Marinho ²
Kelly Rodrigues ²

ACTION OF FUNGI IN THE REMOVAL OF METALS FROM WASTEWATER AND ENVIRONMENTAL COMPARTMENTS: A REVIEW

Recibido el 10 de julio de 2022. Aceptado el 25 de enero de 2022

Abstract

Metal-rich effluents are very common and cause great concern, although these elements are easily found in nature, they appear in very small concentrations. Thus, from anthropic actions, the metals end up being disposed in environments where they would be easily found and with high concentrations, in a way that it's necessary these pollutants are treated in an adequate and sustainable way. There are several methods for metal removal, them being chemical, physical and biological. The metal adsorption is one of the most used treatment method for metal removal from liquid media due to its simplicity, ease operation and cost-effectiveness, especially if the adsorbent used is abundant. The adsorption process, when using a biological adsorbent, is called biosorption/bioaccumulation, which, in addition to the advantages already mentioned, expands the possibilities with the use of organic waste, living or dead organisms or other low-cost material. The objective of the present review is to carry out a survey regarding the removal of metals by biosorption and bioaccumulation. The processes known as biosorption and bioaccumulation have gained much prominence in the last two decades due to good results in the removal and recovery of metal ions. Nowadays several types of biosorbents are used, such as organic waste from industrial segments, precisely because it is a sector that produces waste in abundance. In addition to waste, plants and microorganisms are also widely used in metal removal processes. Fungal biomass, living or dead, plays a very important role in this treatment process. They have a great ability to adsorb metals in aqueous media and, when it comes to living biomass, their versatility and ability to resist and adapt to different concentrations of metals can be taken into account. Additionally, metabolism in the bioaccumulation process can be one more tool in the treatment process. The *Aspergillus* and *Penicillium* genera are one of the most used ones for the removal of various metals isolated or in solutions with removal efficiencies that, according to the studies observed, could range from 28 to 99%. That being said, it is important to study and select fungal strains capable of promoting the removal of various metals in different concentrations, with the intention of reducing the impacts caused by effluents contaminated with them.

Keywords: fungi, biosorption, bioaccumulation, metal removal, bioremediation.

¹ Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

² Laboratório de Tecnologia Ambiental, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil.

* *Autor correspondente:* Laboratório de Tecnologia Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Avenida Treze de Maio, n. 2081, Benfica, Fortaleza, Ceará, Brasil. CEP: 60040-215. Email: nathaliamagalhaes.tga@gmail.com

Resumo

Os efluentes ricos em metais são muito comuns e geram grande preocupação, pois, embora estes elementos sejam encontrados facilmente na natureza, eles encontram-se em concentrações muito pequenas. Assim, a partir das ações antrópicas, os metais acabam sendo dispostos em ambientes onde não seriam facilmente encontrados e em concentrações elevadas, de modo que é necessário que esses poluentes sejam tratados de forma adequada e sustentável. Existem diversos métodos para remoção de metais, sendo eles químicos, físicos e biológicos. A adsorção de metais é um dos métodos de tratamento mais utilizados para remoção de metais do meio líquido devido a sua simplicidade, facilidade de operação e bom custo-benefício, principalmente se o adsorvente utilizado for abundante. O processo de adsorção, quando utiliza um adsorvente biológico, é chamado de biossorção/bioacumulação, que, além das vantagens já citadas, amplia as possibilidades com o uso de resíduos orgânicos, organismos vivos ou mortos ou outro material de baixo custo. O objetivo da presente revisão é realizar um levantamento a respeito da remoção de metais por biossorção e bioacumulação. Os processos conhecidos como biossorção e bioacumulação ganharam muito destaque nas últimas duas décadas devido a bons resultados de remoção e recuperação dos íons metálicos. Atualmente, são utilizados diversos tipos de biossorbentes, como resíduos orgânicos provenientes dos segmentos industriais, justamente por ser um setor que produz resíduo em abundância. Além dos resíduos, plantas e micro-organismos também são bastante empregados nos processos de remoção de metais. A biomassa fúngica, viva ou morta, tem um papel muito importante nesse processo de tratamento. Por possuírem uma ótima capacidade de adsorção dos metais em meio aquoso e, quando se trata de biomassa viva, pode ser levada em consideração a sua versatilidade e capacidade de resistir e se adaptar a diferentes concentrações de metais. Adicionalmente, o metabolismo no processo de bioacumulação pode ser uma ferramenta a mais no processo de tratamento. Os gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* são uns dos mais empregados para remoção de diversos metais isolados ou em coquetéis, tendo eficiências de remoção que, segundo os trabalhos observados, puderam variar entre 28 a 99%. Neste sentido, é importante o estudo e seleção de cepas fúngicas capazes de promover a remoção de diversos metais em diferentes concentrações, com a intenção de reduzir os impactos causados por efluentes contaminados com metais.

Palavras-chave: fungos, biossorção, bioacumulação, remoção de metais, biorremediação.

Introdução

O crescente desenvolvimento urbano, somado a intensa industrialização, atividades de mineração e práticas agrícolas acarretam o aumento acelerado da geração de diversos resíduos que, muitas vezes, têm seu descarte inadequado no ambiente. Todo esse processo é capaz de produzir enormes volumes de poluentes perigosos, sendo eles orgânicos ou inorgânicos, que em contato com o solo e ecossistema aquático, resulta em sua contaminação (Mahapatra *et al.*, 2020).

A grande problemática é que esses poluentes inorgânicos são tóxicos, bioacumulativos e não-biodegradáveis, tornando-se uma preocupação há anos (Lu *et al.*, 2020), sendo encontrados em diferentes resíduos e nos compartimentos terrestres, como resultado das atividades antrópicas, como em lodos de reatores destinados ao tratamento de águas residuárias, em mananciais, mangues e sedimentos lacustres e marinhos (Xiao *et al.*, 2021).

Foram reportadas concentrações de 0.8 (Cd) a 540 µg/g (Mn) na parte superior do sedimento do mangue do mar Maowei (Jiang *et al.*, 2020), sendo que em solos em área sob a influência de garimpos,

foram encontrados níveis muito mais elevados de vários metais pesados (mg/g): Al (28), Fe (> 200), Cd (43), Cr (90), Pb (93), Ni (100) e Zn (260), associados ao ouro e ainda em horizontes ferrosos e aluminosos do solo, os quais são liberados para mananciais (Costa, 1992; Lima *et al.*, 2015).

Carvalho *et al.* (2017), ao monitorarem metais pesados no Rio Doce, fortemente impactado por rejeitos de atividade de mineração oriundo do rompimento de uma barragem de contenção, detectaram alumínio, manganês, cobre e níquel, sendo o alumínio, o metal presente em maior concentração, 9.4 mg/L.

A presença desses elementos no meio ambiente faz com que a legislação busque estabelecer limites para a concentração deles, visando a segurança ambiental e a saúde humana. Na legislação brasileira, são reportados como limite para a presença de ferro e alumínio em águas subterrâneas os valores de 2450 e 3500 µg/L, respectivamente, porém para estes metais não são estabelecidos valores para sua presença no solo em decorrência de atividade agrícola, doméstica ou industrial. Por outro lado, para outros metais como chumbo e cromo, a legislação aponta limites bem mais restritivos tanto em águas subterrâneas (10 µg/L; 50 µg/L) como no solo (72 mg/kg; 75 mg/kg) visando a qualidade de vida (Brasil, 2009).

Limites também são estabelecidos tanto para descarte de águas residuárias em corpos hídricos receptores, como em águas de abastecimento. Em águas residuárias, são previstas concentrações limites para vários tipos de metais pesados (mg/L): ferro dissolvido (15.0), chumbo (0.5), cádmio total (0.2), cromo hexavalente (0.1), manganês dissolvido (1.0) e mercúrio (0.01) (Brasil, 2011). Já em águas destinadas ao abastecimento, as concentrações de ferro, manganês, cádmio, mercúrio e cromo, não podem exceder a 2.4 mg/L, 0.4 mg/L, 0.003 mg/L, 0.001 mg/L, 0.05 mg/L, respectivamente (Brasil, 2021).

É importante ressaltar que os efeitos danosos da presença de metais pesados no ambiente vão além da sua poluição, pois pode ocorrer a erradicação de espécies endêmicas e interferir negativamente nas interações ecológicas e processos evolutivos dos ecossistemas (Teixeira *et al.*, 2020) devido ao seu caráter persistente, acumulativo e de toxicidade, causando impacto deletério à flora e à fauna de corpos d'água com o comprometimento da relação trófica, por meio do processo de bioacumulação seguido de biomagnificação (Sanyal *et al.*, 2015; Paria *et al.*, 2021). Na saúde humana, esses elementos causam efeitos nocivos ao diminuírem a concentração de elementos essenciais, como proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos, danificando os tecidos vivos (Cupertino *et al.*, 2017; Teixeira *et al.*, 2020), além de poderem se tornar cancerígenos e interagir com o DNA celular e proteínas, causando danos oxidativos em macromoléculas biológicas (Briffa *et al.*, 2020; Paria *et al.*, 2021).

Dessa forma, são necessários meios de remoção desses metais, a fim de minimizar os impactos causados devido ao seu descarte indevido. Os métodos convencionais, como, por exemplo, aqueles destinados aos meios aquosos, como precipitação por produtos químicos, coagulação,

redução e troca iônica (Conicelli, 2017), podem apresentar inúmeras deficiências, como remoção incompleta, alto custo de equipamento e manutenção, e a facilidade de produção de poluentes secundários (Lu *et al.*, 2020).

Hi *et al.* (2020) mencionam que a adsorção é uma técnica muito usada que produz um efluente final de elevada qualidade quanto à remoção de metais pesados, a partir do uso de vários tipos de adsorventes, desde adsorventes convencionais (carvão ativado, sílica gel) aos materiais não convencionais (nanotubos de carbono, poli-hidroxibutilo), mas também envolve um custo dispendioso.

Assim, faz-se relevante o estudo dedicado às tecnologias alternativas para remoção desses poluentes inorgânicos, tais como a utilização de métodos de bioadsorção e bioacumulação com emprego de biomassa microbiana. Trata-se de métodos alternativos para a remoção de metais que utilizam no meio um bioadsorvente composto de biomassa viva ou morta, de origem variada, desde biomassa vegetal, bactérias e fungos (Billerbeck, 2013).

A literatura aponta ainda diversas vantagens ao substituir os métodos convencionais para remoção de metais pelos métodos de bioadsorção, como, por exemplo, “a alta taxa de renovação na natureza, baixo custo, altas taxas na remoção dos metais, e a possibilidade de recuperação do contaminante, seja incinerando a biomassa ou realizando a sua dessorção” (Módenes *et al.*, 2013).

Ressalta-se ainda, quanto ao uso de biomassa viva, que a adsorção também pode ser amplificada pela produção de substâncias poliméricas extracelulares (EPS), as quais atuam como agentes superficiais ativos para a remoção de metais pesados, por interação iônica entre os grupos de carga negativa presentes no EPS e metais carregados positivamente (Mohapatra *et al.*, 2020; Rodriguez-Freireia *et al.*, 2019), destacando-se os polissacarídeos produzidos pelos fungos (Xiao *et al.*, 2020).

Os fungos são bioadsorventes baratos e ambientalmente sustentáveis, com uma grande diversidade natural e com extenso sítio ativo em sua superfície celular, devido à presença de grupos funcionais tais como -OH, -NH e -COOH, facilitando a ligação com os íons metálicos (Lei *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019).

Os estudos sobre a utilização dos fungos para remoção de metais já vêm, há mais de 20 anos (Lu *et al.*, 2020), resultando em inúmeras pesquisas que exploram a capacidade de bioadsorção da grande variedade do reino Fungi. Mas, mesmo sendo uma tecnologia conhecida, diversas pesquisas destacam a necessidade de explorar novas cepas, que possam ser capazes de remover uma maior quantidade de metais e outras estratégias que possibilitem a otimização do processo. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo realizar um levantamento sobre o que vem sendo estudado nos processos de bioadsorção e bioacumulação de metais.

Metais e seus impactos ambientais

Desde quando os processos industriais foram impulsionados, passando a fazer parte do nosso cotidiano, uma série de rejeitos sólidos, líquidos e gasosos, passaram a ser produzidos de forma acelerada. Muitos desses processos industriais utilizam grandes volumes de água, podendo causar impactos negativos aos ecossistemas, principalmente quando descartados sem o tratamento adequado. As contaminações ocorrem devido aos resíduos gerados nas atividades de diversos segmentos (Freire *et al.*, 2000; Aquino Neto *et al.*, 2011). Neste sentido, contaminações no solo e na água proveniente de produtos químicos perigosos sempre foram motivo de preocupação para muitos pesquisadores (Musarurwa e Tavengwa, 2020).

Esses rejeitos podem ser dotados de moléculas naturais ou sintéticas que, em contato com ambientes naturais, apresentam características tóxicas e/ou de difícil degradação (Gaylarde *et al.*, 2005).

Entre os resíduos gerados e que são dispostos no ambiente por ação antrópica, os resíduos dotados de metais são de grande preocupação para gestão dos ecossistemas. Os metais pesados fazem parte de um grupo de elementos químicos que possuem densidade relativa maior que 5 g/cm^3 e estão presentes na natureza, principalmente, em rochas (Baker *et al.*, 1994). Os metais podem ser ou não essenciais aos organismos, alguns deles, como magnésio, ferro, cobre e manganês, por exemplo, em concentrações traço, cumprem um papel de grande importância para a manutenção da vida, até mesmo fazendo parte das atividades enzimáticas. Mas mesmo estes, quando em altas concentrações, podem ser prejudiciais para o desenvolvimento e metabolismos dos organismos (Zheng *et al.*, 2014). Exemplo disto é o níquel, que é um componente estrutural da enzima urease, mas seu nível acima de 5 mg/kg por dia pode causar danos à saúde humana (Hou *et al.*, 2019).

Entre os metais, existe também os que não tem função biológica positiva, podendo ser altamente tóxicos para os seres vivos, mesmo em baixas concentrações (Zheng *et al.*, 2014), como o chumbo e o mercúrio, sendo que o primeiro, em geral, não é encontrado comumente em águas naturais, a não ser como produto de poluição pelo descarte de resíduos, exercendo efeitos tóxicos em concentrações no sangue menores que $10 \text{ } \mu\text{g/dL}$ (Moreira e Moreira, 2004). Já o mercúrio, tem sua toxicidade desencadeada a partir de 0.01 mg/L (Silva e Estanislau, 2015).

Os metais são encontrados naturalmente nas rochas, na crosta terrestre (Duruibe *et al.*, 2007) e até mesmo em sedimentos. No entanto, são as atividades antrópicas a principal porta de entrada destes poluentes em ambientes, nos quais não seriam facilmente encontrados (Vale, 2010) e, em decorrência do aumento do processo de urbanização e industrialização, é cada vez mais frequente encontrar diversos metais no meio aquático (Wu *et al.*, 2020).

A grande problemática com relação à disponibilidade dos metais nos ecossistemas é que, além de ter uma natureza persistente, eles não são biodegradáveis, podem possuir elevada toxicidade (Lakard *et al.*, 2015) e caráter bioacumulativo, aumentando sua concentração à medida que vai percorrendo, sucessivamente, por meio da cadeia alimentar (Cao *et al.*, 2014; Dixit *et al.*, 2015).

A ação antrópica disponibiliza diversos metais nos ecossistemas, a partir de atividades como construção e reparo de navios (Ramos, 2013), curtimento de couro, fabricação de tintas (Selvi *et al.*, 2001), tinturaria têxtil (Iskandar *et al.*, 2011), mineração, operações de fundição, agricultura intensiva, efluentes domésticos (Nouri *et al.*, 2009; Xiang *et al.*, 2019), galvanoplastia, produção de pesticidas, baterias, cerâmicas (Latif *et al.*, 2020), ou até mesmo acidentes ambientais, como nos casos recentes dos rompimentos das barragens com rejeitos de mineração.

De acordo com Sobol e Schiest (2012), essas atividades são importantes contribuintes para contaminações ambientais por metais, visto que, a presença deles em concentrações acima do tolerável pode causar danos severos aos organismos.

Alguns metais, como alumínio, cromo e chumbo, podem ser facilmente encontrados em fontes de poluição provenientes de efluentes industriais. Estes e outros metais de forma excessiva podem ter efeito deletério à saúde, causando ulceração na pele, osteomalácia e até mesmo danos graves ao fígado, pulmão e ao sistema nervoso (Chen *et al.*, 2017).

Os metais podem também exercer toxicidade às plantas e aos micro-organismos, causando danos como: desnaturação, mudanças na permeabilidade da membrana plasmática, mudanças de pigmentação, peroxidação dos lipídios, produção de radicais livres que prejudicam a membrana e estrutura celular, e alterações nas atividades mitocondriais (Nagajyoti *et al.*, 2010).

Nos micro-organismos, a toxicidade atua a partir de bloqueio de grupos funcionais importantes promovendo a desnaturação enzimática. Os metais têm capacidade de se ligar com grupos funcionais da parede celular dos micro-organismos, formando complexos metálicos denominados também de compostos de coordenação que podem ser nocivos, ainda que estes efeitos possam ser inibidos a partir da complexação e precipitação celular (Valix e Loon, 2003).

Na Tabela 1 são apresentados valores limites da presença de metais em águas destinadas ao abastecimento humano, segundo diretrizes da Organização Mundial de Saúde (OMS), com base em diferentes autores.

Tabela 1. Características, concentração máxima de metais pesados permitida em água potável, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), e seus efeitos para a saúde e meio ambiente, e impactos relacionados ao ambiente e à saúde humana.

Metal	Massa Molar (g/mol)	Concentração máxima permitida (mg/L)	Impacto ao meio ambiente e a saúde	Referências
Al	26.98	0.10 a 0.20	Superexposição relacionada ao risco de Alzheimer, doença de Parkinson e esclerose lateral amiotrófica.	Filippini <i>et al.</i> (2019)
Sb	121.76	—	Sb (III) é a forma mais estável em meio aquoso e permeável às membranas celulares. Liga-se ao ferro da hemoglobina e inativa sítios ativos de proteínas, causando toxicidade. Ingestão ou inalação está relacionada a problemas respiratórios.	Néri (2014); CETESB, 2017a
As	74.90	0.05	Instiga bronquite, hiperqueratose, câncer, úlcera, dermatite, cirrose hepática e distúrbios mentais.	Chakraborti <i>et al.</i> (2017)
Cd	112.40	0.003	Afeta a absorção de nutrientes das plantas, transpiração e até a fotossíntese.	Leng <i>et al.</i> (2020)
Pb	207.20	0.05	Induz a danos neurológicos e distúrbios cardiovasculares.	Bilal <i>et al.</i> (2013)
Cu	63.50	2.00	Causa distúrbios respiratórios, quadros de vômitos pelo depósito no fígado, distúrbios renais, alergias e anemia.	Peixoto <i>et al.</i> , 2021
Cr	52.00	0.05	Dermatites alérgicas e câncer. Uma vez presentes em águas de rios, pode chegar até os oceanos e depositar-se nos sedimentos. O cromo hexavalente tem o potencial de acumular-se por difusão passiva em espécies aquáticas.	CETESB, 2017a
Hg	200.60	0.001	Afeta o sistema nervoso e renal.	Wu <i>et al.</i> , 2014; Kushwaha <i>et al.</i> , 2015
Zn	207.20	0.05	Causa dores estomacais, febre, distúrbios respiratórios, alterações no crescimento e câncer.	Caprarescu <i>et al.</i> (2015)
Fe	55.80	3.00	Em águas de abastecimento, a inserção do cloro para oxidar o ferro pode acarretar na formação de trihalometanos, na presença de precursores. Hemocromatose e células danificadas no fígado em altas doses.	Ahmed <i>et al.</i> (2019); CETESB, 2014

Uma vez presentes em efluentes descartados em meio aquático, os metais podem reduzir a capacidade de autodepuração dos mananciais devido sua ação tóxica para com os organismos responsáveis pelo processo de decomposição da matéria orgânica na água (Aguiar *et al.*, 2002), contribuindo com a poluição do ambiente e com o desequilíbrio dos organismos do ecossistema afetado, causando problemas de ordem física, biótica e socioeconômica, na medida que afetam o ambiente natural e à saúde humana (Ramos, 2013). Neste sentido, é importante o desenvolvimento e a adoção de boas técnicas e processos para remover os metais pesados do ambiente e/ou mitigar os efeitos danosos da contaminação (Musarurwa e Tavengwa, 2020).

Formas de remoção de metais

No ambiente natural, os metais podem assumir outras formas através de reações químicas, podendo resultar em compostos muito mais tóxicos que os íons isolados, assim como ocorre com o cromo, arsênio e mercúrio, que tem sua toxicidade dependente da forma química que se encontra e do seu estado de oxidação (Leite, 2002).

O tratamento adequado de efluentes que contenham metais é necessário, pois estes possuem potencial tóxico e seu lançamento nos corpos receptores causa impactos negativos sobre o ambiente. Assim, o lançamento adequado desses resíduos é de grande preocupação, sobretudo no caso dos efluentes industriais, pois, no geral, são muito volumosos e requerem técnicas específicas por sua complexidade, as quais podem ser mais onerosas. O tratamento a ser aplicado em um dado efluente irá depender das características e da forma que os íons metálicos nele se encontram (Vale, 2010).

Existe uma grande variedade de métodos para remover metais pesados, dividindo-se entre métodos físicos, químicos e biológicos que podem ser usados, em conjunto ou separadamente, para tratar uma infinidade de substâncias em diferentes matrizes. Estas formas de tratamento, que podem ser aplicadas em matriz aquosa, sólida ou gasosa, têm o objetivo de modificar a fase da substância de interesse, ou transformá-las em compostos inertes, ou com grau de toxicidade reduzida (Aquino Neto *et al.*, 2011).

Métodos Físicos e Químicos

Os métodos físicos e químicos são muito citados na remoção e recuperação dos metais de ambientes contaminados (Mahapatra *et al.*, 2020), tais como: precipitação, troca iônica, separação por membrana, adsorção em carvão ativado, osmose reversa e os tratamentos eletroquímicos (Vale, 2010). Contudo, esses métodos apresentam como desvantagem seu custo elevado, além de serem muitas vezes processos complexos (Song *et al.*, 2014), somada à ineficiência de tratar baixas concentrações dos íons metálicos (Beni e Esmaili, 2020; Simonescu e Ferdes, 2012) e por gerar um lodo remanescente difícil de tratar (Esmaili e

Beni, 2015a), o que torna algumas técnicas insustentáveis no ponto de vista ambiental (Mulligan *et al.*, 2001).

Na Tabela 2 são apresentados processos de tratamento que podem ser utilizados para a remoção de metais de diferentes meios e suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens de processos para remediação de metais.

Processo	Vantagens	Desvantagens
Filtração e Precipitação química	Mais utilizado para remoção de metais de efluentes. Simples e de baixo custo.	Eficiência não efetiva para concentrações elevadas de metais. Difícil recuperação do metal.
Adsorção	Adsorventes de baixo custo. Uso de carvão ativado.	Custos do pré-tratamento que o carvão ativado deve receber para adsorção em metais.
Evaporação	Obtenção de efluente puro após a separação dos metais do meio aquoso.	Requer fonte de energia, além de ser um sistema oneroso.
Osmose reversa	Gera efluente adequado para reuso.	Altas pressões e custo elevado.
Oxidação química	Mineralização.	Reagentes químicos.
Tratamento eletroquímico	Possibilita a recuperação do metal, e evita o uso de outros compostos químicos que sejam tóxicos.	Para concentrações elevadas, além de ser um sistema oneroso.
Troca iônica	Eficiente e possibilita a recuperação do metal.	Sensível a presença de partículas. Utiliza resina, para sequestro dos íons, que precisa ser reposta de tempos em tempos devido aos desgastes. Resina de custo elevado.

Fonte: Adaptado de Volesky, 2001 e Vale (2010).

Shan *et al.* (2020) reportam que alguns desses métodos não são muito viáveis para remoção de metais por serem danosos ao meio ambiente, de menor eficiência, custo elevado e/ou com limitações para operação, sendo a adsorção um dos métodos mais eficientes para remoção de metais pesados devido ao vantajoso custo-benefício, principalmente se for utilizado um adsorvente de baixo custo e fácil disponibilidade (Baimenov *et al.*, 2020; Khaled *et al.*, 2009).

Na adsorção, o poluente solúvel (adsorvato) é removido do meio (fluido) por contato com o agente adsorvente (sólido), de modo que os átomos, moléculas ou íons sejam retidos ou aprisionados na superfície do adsorvente (García-Rosales *et al.*, 2012; Vale, 2010), através de atração exercida na superfície por forças não compensadas, criando um campo elétrico no ambiente ao redor do adsorvente (Vale, 2010), tendo muita popularidade devido a sua simplicidade, facilidade de operação e maior viabilidade de custo (Gopi *et al.*, 2019; Wu *et al.*,

2019). A adsorção pode ser do tipo química ou física, ou então as duas formas podem ocorrer simultaneamente (Ruthven, 1984).

Na Tabela 3 são apresentadas as características e os mecanismos envolvidos na adsorção física e química.

Tabela 3. Tipo, mecanismos e características da adsorção física e química.

Tipo	Ocorrência	Mecanismo	Características
Física	As forças intermoleculares de atração na fase fluida e na superfície sólida são maiores que as forças atrativas intramoleculares, resultando em uma interação fraca e reversível com a superfície. Nesta fase, nenhuma ligação é quebrada ou feita (natureza química do adsorvato não se altera).	Adsorção	Baseado em cargas eletrostáticas, as moléculas aderem-se a uma superfície sólida.
		Microprecipitação inorgânica	Ocorre com a variação das condições ambientais na área próximo a biomassa, resultando na variação do pH e ocasionando a precipitação.
Química	Envolve interações químicas entre o adsorvato e o adsorvente, resultando na formação de um composto de superfície ou complexo de adsorção. Ocorre através do rearranjo de elétrons do fluido. A interação é forte e difícil de separar adsorvato do adsorvente.	Complexação	Formação de compostos por associação de duas ou mais espécies.
		Coordenação	Um átomo central unido a outros átomos por ligações covalentes.
		Quelação	Formação quelatos, que são complexos onde há um composto orgânico unido ao metal.
		Troca iônica	Permuta de íons que se encontram formando espécies moleculares ou atômicas que perderam ou ganharam elétrons.

Fonte: Adaptado de Vale, 2010 e Pino (2005).

Entre os adsorventes utilizados, o carvão ativado é um dos mais populares devido a sua grande área de superfície e porosidade, que faz dele uma importante ferramenta para remoção de metais (Do, 1998). Ele pode ser feito a partir de diferentes substâncias orgânicas (Palodkar *et al.*, 2021), através de conversão termoquímica em altas temperaturas e na ausência de oxigênio. Mas o processo de transformação da matéria-prima em carvão ativado é dependente de muitos fatores, como a natureza não perigosa do material precursor, disponibilidade, custo de produção e características estruturais e de textura que o material precursor será capaz de gerar (Mariana *et al.*, 2021). Para evitar todo esse processo de fabricação, outros tipos de adsorventes, como biossorventes, que serão abordados adiante, têm sido estudados como material alternativo.

Biorremediação

Entre os métodos de tratamento, o tratamento biológico, ou biorremediação, vêm ganhando destaque e protagonizando diversas soluções para os resíduos poluentes (Lima *et al.*, 2011), pois permite a remoção ou redução dos poluentes (Conicelli, 2017).

A biorremediação permite a descontaminação de solos (Ekperusi e Aigbodion, 2015) e o tratamento de grandes volumes de efluente, a fim de transformar os xenobióticos em formas menos tóxicas ou mineralizar integralmente. Este processo consiste na utilização de organismos, podendo ser plantas, bactérias, fungos (Amezcuá-Allieri e Rodríguez-Vázquez, 2008), algas, leveduras (Mahapatra *et al.*, 2020), ou até mesmo a junção de plantas e micro-organismos em um processo de simbiose, com a finalidade de atenuar poluentes.

O processo biológico é capaz de tratar uma série de ambientes contaminados, como o solo, água superficial e subterrânea, além de uma série de rejeitos industriais. Mesmo outros processos, como o físico ou químico, sendo capazes de remediar ambientes contaminados, a biorremediação é uma alternativa ecologicamente mais viável, pois são os micro-organismos que participam ativamente de grande parte dos ciclos biogeoquímicos e possuem o papel fundamental de reciclar a maior parte dos compostos e moléculas. Sendo assim, a biorremediação pode ter uma boa eficácia em ambientes contaminados com compostos persistentes ou de elevada toxicidade (Gaylarde *et al.*, 2005).

A biorremediação por micro-organismos é um processo que pode ocorrer por meio da adsorção, a partir de ligações com os grupos funcionais na superfície celular ou também por formação de enzimas extracelulares, que contribuem para a remoção do poluente (Silver e Phung, 2005). Quando se trata da remoção de metais por meio da biorremediação, os processos envolvidos são denominados de bioissorção e bioacumulação (Igiri *et al.*, 2018).

Bioissorção e bioacumulação

Embora a exposição microbiana às concentrações elevadas de metais possa matá-los, os micro-organismos também têm a capacidade de resistir e se adaptar a diferentes concentrações, adquirindo resistência aos íons metálicos (Silver e Phung, 2005), capacidade esta que faz com que as células microbianas sejam ferramentas importantes no processo de bioacumulação e bioissorção e sua conseqüente remoção do meio.

Na bioissorção ocorre o sequestro de íons metálicos, que ficam ligados superficialmente à parede celular (Gönen e Aksu, 2009; Kavita e Keharia, 2012), e que independe de energia e das atividades biológicas (Hlihor *et al.*, 2017). A bioissorção é um processo que depende apenas das propriedades químicas e físicas do bioissorvente (Volesky, 2003).

No que se refere à bioacumulação, há a captação do íon metálico a partir da ação microbiana pela atuação do metabolismo (Conicelli, 2017), sendo os íons assimilados intracelularmente (Kavita e Keharia, 2012), por isso, necessariamente, a célula deve estar viva (Li *et al.*, 2017).

Na Tabela 4 é apresentada uma comparação entre os dois processos, tanto bioacumulação como bioissorção.

Tabela 4. Diferenças entre os processos de bioacumulação e bioissorção.

Propriedade	Bioacumulação	Bioissorção
Custo	Custo mais elevado devido à manutenção da célula viva.	Custo mais baixo, pois utiliza biomassa morta ou outros bioisorventes provenientes de resíduos da agroindústria.
Seletividade	Melhor em comparação com a bioissorção.	Fraco e melhorado, com modificações químicas.
Adaptação	Depende da natureza da biomassa e é afetada por elevadas concentrações de metais.	Independente de adaptação.
Recuperação e reutilização de adsorventes	Possibilidade mais limitada.	Maior possibilidade de reuso por vários ciclos.
Recolha da substância tóxica	Pode inviabilizar a biomassa para uso no ciclo seguinte.	É possível fazer a retirada da substância ao utilizar soluções adequadas (ácidas ou alcalinas).

Fonte: Beni e Esmaeili, 2020.

Estes processos são altamente dependentes das condições do meio, como pH, solubilidade dos íons (Li *et al.*, 2018), temperatura, concentração do bioisorvente e tempo de retenção, além de outros fatores secundários, mas não menos importantes, como a agitação, tamanho do bioisorvente e concentração de metal no meio (Esmaeili e Beni, 2015a, Esmaeili e Beni, 2015b).

O uso de materiais biológicos ou até mesmo de micro-organismos vivos ou mortos, vem sendo usado há algumas décadas para tratamento de efluentes contendo corantes ou íons metálicos (Çolak *et al.*, 2009).

Geralmente, os bioisorventes são produzidos a partir de resíduos orgânicos de algum segmento industrial, ou de materiais de baixo custo, e devem ser submetidos a um processo que os tornem viáveis à adsorção. Então, a matéria-prima deve ser lavada, seca e triturada, procedimento esse que aumenta sua área de contato, podendo ainda receber tratamento químico para fortalecer os grupos funcionais existentes na sua superfície. Além disso, o bioisorvente pode ser utilizado em

diversas formas e tamanhos, desde pó até nanofibras, sem e com revestimento, com nano pó ou pó magnetizado, sendo que o tamanho do material usado como adsorvente influencia na área superficial de contato, no volume a ser usado e no tempo de retenção do poluente dentro do sistema de tratamento (Beni e Esmaeili, 2020).

Para um biossorvente ser viável comercialmente, ele deve seguir alguns critérios, como: alta eficiência de remoção dos poluentes e cinética apropriada, tamanho e forma adequada, boa propriedade física, boa resistência mecânica e química, estabilidade térmica, grande disponibilidade, ser possível de se regenerar e reutilizar, apresentando viabilidade de custo quanto à sua separação do poluente visando à recuperação do mesmo (Shi *et al.*, 2015; Lingamdinne *et al.*, 2017; Saha *et al.*, 2017).

Uma gama diversificada de biossorventes tem sido usada com o objetivo de remover metais pesados dos mais diferentes ambientes, desde sementes de cebola (Sheikh *et al.*, 2021), casca de melancia (Liu *et al.*, 2012, Oghenejoboh 2018) –, fibra de junta (Huang *et al.*, 2019), biomassa microbiana (Singh *et al.*, 2021), entre outros.

Na literatura, plantas e biomassa de origem agroindustrial são bons adsorventes para metais como cádmio (Cd II), mercúrio (Hg II), cobre (Cu II), cromo (Cr VI e III), chumbo (Pb II) e zinco (Zn II), com a remoção favorecida pela presença de celulose em sua constituição, a partir de mecanismos de complexação, adsorção, quelação e troca iônica (Jamshaid *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2021). Na biomassa microbiana, seja bacteriana, de fungos ou algas, a remoção dos metais ocorre pela existência de sítios de complexação nessas células devido a diferentes compostos que constituem as células microbianas, sendo citados peptidoglicano (bactérias) e quitosana (algas e fungos), por exemplo (Singh *et al.*, 2021).

A quitosana é um polissacarídeo não tóxico, biodegradável e de performance excelente na remoção de íons metálicos, tanto como agente quelante ou como material adsorvente, estando presente de 80% a 90% na parede celular de fungos (Cabrera-Barjas *et al.*, 2020), o que os torna biossorventes ótimos, além de características como a sua morfologia robusta, área superficial elevada e de habilidades metabólicas na produção de enzimas poderosas que atuam na remoção de diferentes poluentes (Ramya *et al.*, 2021; Moreira, 2010).

Fungos como biossorvente

Os fungos são conhecidos pelo seu papel na eficiente remoção de uma série de poluentes, dentre eles os metais pesados, seja por meio de biossorção ou bioacumulação (Chen *et al.*, 2017). Neste sentido, o uso da biomassa surge como um processo de baixo custo e eficaz para a recuperação de metais (Moreira, 2010).

Em geral, os metais pesados exercem toxicidade sobre os fungos, podendo causar lise celular. Neste sentido, muitas pesquisas são direcionadas para descobrir o potencial de tolerância de diversas cepas de fungos, pois os potenciais de gêneros e espécies são distintos, variando não somente com relação a concentração, como também da natureza do metal (Ezzouhri *et al.*, 2009).

Um ambiente natural contaminado por metais causa estresse aos organismos presentes nele, e para os fungos não é diferente. A fim de fornecer resistência a esse estresse, causado por poluentes tóxicos, como no caso dos metais, os fungos desenvolveram mecanismos ativos de defesa, e, graças isso, são capazes de promover a bioabsorção e biocumulação, e ainda a quelatização de metais (Priyadarshini *et al.*, 2021).

Os fungos produzem ácidos orgânicos e pigmentos e, a partir deles, podem complexar ou precipitar metais. Um exemplo disto é o ácido cítrico, que age como quelante de metais assim como o ácido oxálico, também produzido pelos fungos, que interage com a forma iônica dos metais e formam cristais insolúveis de oxalato ao redor da parede celular e no meio externo (Murphy e Levy, 1983).

A capacidade que os fungos têm de precipitar metais, seja de forma intracelular ou extracelular, ou até mesmo pela alteração da valência do metal, torna-os resistentes a diversos metais. Os fungos podem absorver os íons em seus esporos e micélio, o que possibilita sua atuação como biocatalisadores para o processo de remoção de poluentes metálicos (Ayangbenro e Babalola, 2017).

Na Tabela 5 são apresentados diversos fungos aplicados ao tratamento de metais por bioabsorção/bioacumulação e suas capacidades de remoção dos íons correspondentes. Na maioria dos trabalhos apresentados na Tabela 5, os metais pesados removidos foram chumbo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), cádmio (Cd) e arsênio (As). Contudo, a literatura aborda muitos outros metais em diferentes concentrações e meios, e estes metais podem ser encontrados em coquetéis (Dey *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2020) e em meios contendo outros poluentes associados (Chen *et al.*, 2020; Saravanan *et al.*, 2021), sendo eles na água (Allothman *et al.*, 2019) ou no solo (Khan *et al.*, 2019).

Já com relação a concentração inicial de metais das pesquisas, esta variável pode ser bastante distinta uma das outras, pois cada espécie de fungos pode possuir tolerâncias diferentes para diferentes metais. Observado no trabalho de Kumar e Dwivedi (2020), citado na Tabela 5, que realizaram experimentações na remoção de arsênio, cromo, níquel e zinco, utilizando cepas de *Aspergillus flavus* CR500; os fatores temperatura, pH, concentração inicial e tempo de contato foram os mesmos na remoção de cada um dos metais, porém as eficiências de remoção obtidas foram distintas de 97.5, 82, 46.6 e 93.3%, respectivamente para cada metal testado.

De acordo com a Tabela 5, os gêneros mais empregados foram *Aspergillus* e *Penicillium*, os quais são muito importantes na área de tratamento de efluentes, sendo investigados há décadas como ferramenta para a biorremediação, pois as espécies destes gêneros estão entre as mais resistentes (Ezzouhri *et al.*, 2009).

A exemplo disso, cita-se o trabalho de Congeevaram *et al.* (2007), no qual foi constatado que *Aspergillus* sp. exibiu resistência elevada ao cromo, sobressaindo-se dentre outras espécies de fungos e bactérias também submetidas às mesmas condições, sendo capaz de tolerar concentrações de até 10.000 mg/L e manter uma taxa de sobrevivência de 60%. Foi relatado também que *Penicillium chrysogenum* tolerou concentração de 600 mg/L de cromo (Levinskaite, 2002).

Akhtar *et al.* (2013) testaram uma série de isolados fúngicos com contato com metais pesados, entre as cepas avaliadas, os isolados de *Aspergillus* foram os mais resistentes. *Aspergillus niger* (SF-5) obteve uma tolerância de 1716 mg/L ao cobre, enquanto uma cepa de *Aspergillus* sp. tolerou até 9218 mg/L de cádmio.

No entanto, mesmo com tantas espécies conhecidas capazes de obter bons resultados de remoção de poluentes, Passos *et al.* (2009) defendem a necessidade de prospecção de novas linhagens que enfrentaram condições adversas e foram capazes de adaptar-se, pois a capacidade de tolerância à toxicidade e a capacidade degradativa dessas linhagens devem ser estudadas.

A temperatura é uma variável muito importante para os mecanismos dependentes de energia e, no caso da remoção de metais por micro-organismos, pode causar ionização das frações químicas, além de afetar a estabilidade da parede celular ou sua configuração, ainda podendo afetar, concomitantemente, locais de ligação das espécies fúngicas, causando uma menor remoção de metais (Congeevaram *et al.*, 2007). Nos estudos apresentados (Tabela 5), a temperatura a qual os fungos foram submetidos variaram de 20 a 32°C, sendo que, quase sempre, serão equivalentes à temperatura ambiente, com os micro-organismos atuando na faixa mesófila.

Grande parte dos experimentos usando biomassa fúngica ocorreu em um pH em torno de 5, e quase nunca maior que 7 (Tabela 5). Congeevaram *et al.* (2007), ao analisarem cepas de isolados fúngicos, observaram que o pH ideal para remoção de níquel e cromo ficou entre 5 e 5,2 devido à fisiologia do micro-organismo, que influencia o valor do pH do meio externo e interfere na remoção do metal. Particularmente, na fase estacionária de crescimento, as células já adaptadas exibem crescimento logarítmico e consomem os nutrientes do meio, modificando o valor do pH.

Tabela 5. Pesquisas de bioSORÇÃO/bioacumulação com fungos para tratar diferentes metais.

Metais	Fungo	T (°C)	pH	Concentração (mg/L)	TC (dia)	Eficiência de remoção (%)	Referências
As	<i>Aspergillus flavus CR500</i>	28	7.0	5	8	97.5	Kumar e Dwivedi, 2020
Cd	<i>Absidia cylindrospora</i>	20	5.4	50	3	68	Albert <i>et al.</i> , 2018
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	30	-	5	3	63	Dey <i>et al.</i> , 2020
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	25	5.0	100	1/3	33	Chen <i>et al.</i> , 2019
Cr	<i>Aspergillus fumigatus</i>	30	-	5	3	62	Dey <i>et al.</i> , 2020
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	25	5.0	100	1/3	88.6	Chen <i>et al.</i> , 2019
	<i>Aspergillus flavus CR500</i>	28	7.0	5	8	82	Kumar e Dwivedi, 2020
Cu	<i>Absidia cylindrospora</i>	20	5.4	50	3	14	Albert <i>et al.</i> , 2018
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	30	-	5	3	37	Dey <i>et al.</i> , 2020
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	25	5.0	100	1/3	63.8	Chen <i>et al.</i> , 2019
Ni	<i>Trametes pubescence</i>	-	4.5	1000	3	8.6	Enayatizamir <i>et al.</i> , 2020
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	30	-	5	3	46	Dey <i>et al.</i> , 2020
	<i>Aspergillus flavus CR500</i>	28	7.0	5	8	46.6	Kumar e Dwivedi, 2020
Pb	<i>Trametes pubescence</i>	-	4.5	1000	3	99	Enayatizamir <i>et al.</i> , 2020
	<i>Absidia cylindrospora</i>	20	5.4	50	3	59	Albert <i>et al.</i> , 2018
	<i>Pleurotus ostreatus ISS-1</i>	28	5.0	500	11	53.7	Wang <i>et al.</i> , 2019
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	30	-	5	3	95	Dey <i>et al.</i> , 2020
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	25	5.0	100	1/3	73.7	Chen <i>et al.</i> , 2019
	<i>Aspergillus flavus CR500</i>	28	7.0	5	8	93.3	Kumar e Dwivedi, 2020
Zn	<i>Aspergillus fumigatus</i>	30	-	5	3	98	Dey <i>et al.</i> , 2020
	<i>Penicillium simplicissimum</i>	25	5.0	100	1/3	28	Chen <i>et al.</i> , 2019
Coquetel (Pb, Cu e Fe)	<i>Penicillium janthinillum GXCR</i>	32	5.0	100	1	85 a 99	Wang <i>et al.</i> , 2022

T: temperatura (°C); TC: tempo de contato (dia).

Talukdar *et al.* (2020) fizeram experimentos variando o pH de 2 a 7, em consórcio de *Aspergillus fumigatus* e *Aspergillus flavus*, em contato com cromo e cádmio. A remoção de ambos os metais aumentou gradativamente até o pH 5, chegando a remover cerca de 80% de ambos os metais, porém a eficiência de remoção diminuiu para valores de pH superiores a 5.

De acordo com Congeevaram *et al.* (2007), em meios com valores baixos de pH, a superfície celular fica protonada e favorece a aproximação de íons carregados negativamente, como o cromo e, conseqüentemente, sua bioacumulação, sendo que há um valor de pH abaixo do qual pode ocorrer competição entre íons H⁺ e os íons metálicos, o que reduz a bioacumulação do metal pela célula microbiana. Para valores mais elevados de pH (≥ 8), tende a ocorrer a formação de precipitados metálicos, o que indisponibiliza a remoção do íon metálico pela célula, como no caso do níquel que em pH a partir de 8, tem sua remoção reduzida pela formação de Ni(OH)₂.

Assim, o pH determina a carga superficial do adsorvente, o grau de ionização e o tipo de adsorção que irá ocorrer, afetando a separação por hidrólise, complexação e oxidação-redução (Wang e Sun, 2013; Yu *et al.*, 2016), sendo importante mencionar que o pH ideal para remoção de metais também pode variar entre as cepas microbianas, pois esta é uma variável de grande importância para os processos de bioadsorção e bioacumulação, além de fundamental para o crescimento e produção enzimática dos fungos (Karthik *et al.*, 2017).

Conclusão

Um ambiente saudável, que mantenha o equilíbrio da biodiversidade, é um bem precioso para a sociedade. Garantir o seu equilíbrio também é promover a saúde humana. O tratamento de poluentes, em especial dos metais, é encarado com muita seriedade pela comunidade acadêmica, e, constantemente, novas técnicas e bioadsorventes vêm sendo desenvolvidos e estudados, a fim de encontrar um meio de baixo custo que seja capaz de remover os metais com bastante eficiência.

A biomassa fúngica tem um importante papel nesse processo de remoção de metais. Sendo assim, muitas pesquisas vêm sendo realizadas no sentido de desvendar cepas capazes de promover bons resultados, isso se dá em virtude da versatilidade desses micro-organismo. Os estudos mostram diferentes gêneros sendo empregados e, frequentemente, esses trabalhos apresentam cepas de *Aspergillus* e *Penicillium*, além de uma grande variedade de fungos de podridão branca.

Os fungos observados no presente trabalho foram capazes de remover uma grande variedade de metais em diferentes concentrações, validando que a biomassa dessas cepas são importantes ferramentas para redução do potencial poluidor de diversos efluentes.

As características e condições do meio, assim como a concentração, tipo e variedade de metais presentes, parecem exercer grande impacto do resultado de remoção desses metais, podendo facilitar o processo de bioadsorção/bioacumulação ou inibir esses processos e gerar um percentual de remoção bem menor que outros trabalhos. Mas não somente esses fatores são cruciais para

determinar o sucesso da remoção, o tipo de fungo empregado também é muito relevante para que ocorra uma boa remoção, pois diferentes cepas de fungos possuem capacidades distintas para remover metais.

Sendo assim, é importante que mais estudos sejam realizados a fim de encontrar cepas capazes de promover remoção de variados metais, isolados ou em coquetéis e otimização dos processos de biorremediação como instrumento para mitigar impactos e combater a crescente poluição ambiental.

Referências bibliográficas

- Ahmed, N., Bodrud-Doza, M., Towfiqul Islam, A. R. M., Hossain, S., Moniruzzaman, M., Deb, N., Bhuiyan, M. A. Q. (2019) Appraising spatial variations of As, Fe, Mn and NO₃ contaminations associated health risks of drinking water from Surma basin, Bangladesh. *Chemosphere*, **218**, 726-740, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.104>
- Akhtar, S., Mahmood–Ul–Hassan, M., Ahmad, R., Suthor, V., Yasin, M. (2013) Metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from soils irrigated with untreated municipal effluente. *Soil Environ.*, **32**, 55-62 disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=PK2013000983>
- Albert, Q., Leleyter, L., Lemoine, M., Heutte, N., Rioult, J. P., Sage, L., Baraud, F., Garon, D. (2018) Comparison of tolerance and biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb) by the soil fungus *Absidia cylindrospora*, *Chemosphere*, **196**, 386 - 392, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.156>
- Alothman, Z. A., Bahkali, A. H., Khiyami, M. A., Alfadul, S. M., Wabaidur, S. M., Alam M., Alfarhan, B. Z. (2019) Low cost biosorbents from fungi for heavy metals removal from wastewater. *Separation Science and Technology*, **55**, 1766-1775, <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1608242>
- Amezcuca-Allieri, M. A., Rodríguez-Vázquez, R. (2008) Impact on metal bioavailability and plant uptake during the bioremediation of a phenanthrene-contaminated soil. *Terra Latinoamericana*, **26**(4), 351 - 359, disponível em: <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1331/1540>
- Aquino Neto, S., Magri, T. C., Silva, G. M., Andrade, A. R. (2011) Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. *Química Nova*, **34**(8), 1468-1471, <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000800030>
- Ayangbenro, A. S., Babalola, O. O. (2017) A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **14**(1), 94 - 109, <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
- Baimenov, A., Berillo, D. A., Pouloupoulos, S. G., Inglezakis, V. J. (2020) A review of cryogels synthesis, characterization and applications on the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Adv. Colloid Interface*, **276**, 102088, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102088>
- Baker, A. J. M., Mcgrath, S. P., Sodoli, C. M. D., Reeves, R. D. (1994) The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling*, **11**, 41-49, [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90077-9)
- Beni, A. A., Esmaeili, A. (2020) Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: A Review. *Environmental Technology & Innovation*, **17**, 100503, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100503>
- Bilal, M., Shah, J. A., Ashfaq, T., Gardazi, S. M., Tahir, A. A., Pervez, A., Haroon, H., Mahmood, Q. (2013) Waste biomass adsorbents for copper removal from industrial wastewater – A review. *Journal of Hazardous Materials*, **263**(1), 322-333, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.071>
- Billerbeck, T. N. (2013) *Remoção de metais de efluente de laboratórios de análise de solo por meio da biossorção com resíduo de Saccharomyces cerevisiae*. Dissertação (Mestrado em meio ambiente urbano e industrial) - Universidade Federal do Paraná, 124 pp. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/46500>
- Briffa, J., Sinagra, E., Blundell, R. (2020) Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, **6**(9), E04691, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>

- Cao, S., Duan, X., Zhao, X., Ma, J., Dong, T., Huang, N., Sun, C., He, B., Wei, F. (2014) Health risks from the exposure of children to As, Se, Pb and other heavy metals near the largest coking plant in China. *Science of The Total Environment*, **472**(15), 1001-1009, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.124>
- Cabrera-Barjas, G., Gallardo, F., Nestic, A., Taboada, E., Marican, A., Mirabal-Gallardo, Y., Avila-Salas, F., Delgado, N., Armas-Ricard, M., Valdes, O. (2020) Utilization of industrial by-product fungal biomass from *Aspergillus niger* and *Fusarium culmorum* to obtain biosorbents for removal of pesticide and metal ions from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**, 104355, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104355>
- Caprarescu, S., Radu, A-L., Purcar, V., Ebrasu, D., Ianchis, R., Sarbu, A., Ghiurea, M., Nicolae, C., Modroagan, C., Vaireanu, D-l., Perichaud, A. (2015) Adsorbents/ion exchangers-PVA blend membranes: Preparation, characterization and performance for the removal of Zn²⁺ by electro dialysis. *Applied Surface Science*, v. **329**(1), 65-75, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.12.128>
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2017a) *Ficha de Informação Toxicológica: Antimônio. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental*. Acesso em 08 de abril de 2022, disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Antimonio.pdf>
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2017b) *Ficha de Informação Toxicológica: Crômio e seus compostos. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental*. Acesso em 08 de abril de 2022, disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cromio.pdf>
- Chakraborti, D., Rahman, M. M., Das, B., Chatterjee, A., Das, D., Nayak, B., Pal, A., Chowdhury, U. K., Ahmed, S., Biswas, B. K., Sengupta, M. K., Hossain, M. A., Samanta, G., Roy, M. M., Dutta, R. N., Saha, K. C., Mukherjee, S. C., Pati, S., Kar, P. B., Mukherjee, A., Kumar, M. (2017) Groundwater arsenic contamination and its health effects in India. *Hydrogeol. J.*, **25**(4), 1165-1181, <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1556-6>
- Chen, S. H., Cheow, Y. L., Ng, S. L., Ting, A. S. Y. (2019) Mechanisms for metal removal established via electron microscopy and spectroscopy: a case study on metal tolerant fungi *Penicillium simplicissimum*. *Journal of Hazardous Materials*, **362**, 394-402, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.077>
- Chen, S. H., Ng, S. L., Cheow, Y. L., Ting, A. S. Y. (2017) A novel study based on adaptive metal tolerance behavior in fungi and SEM-EDX analysis. *Journal of Hazardous Materials*, **334**(15), 132-141, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.004>
- Chen *et al.*, (2020). Removal of sulfamethazine and Cu²⁺ by *Sakaguchia cladiensis* A5: Performance and transcriptome analysis. *Science of The Total Environment*, **746**, 140956, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140956>
- Çolak, F., Atar, N., Olgun, A. (2009) Biosorption of acidic dyes from aqueous solution by *Paenibacillus macerans*: Kinetic, thermodynamic and equilibrium studies. *Chem. Eng. J.*, **150**(1), 122-130 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.12.010>
- Congeevaram, S., Dhanarani, S., Park, J., Dexilin, M., Thamaraiselvi, K. (2007) Biosorption of chromium and nickel by heavy metal resistant fungal and bacterial isolates. *Journal of Hazardous Materials*, **146**, 270-277, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.017>
- Conicelli, B. P. (2017) *Biossorção de chumbo e mercúrio pelas linhagens selvagem e recombinante de C. metallidurans em meio aquoso*. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) – São Paulo, 73 pp, disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-15052017-160603/en.php>
- Cupertino, M. C., Novaes, R. D., Santos, E. C., Bastos, D. S. S., Santos, D. C. M., Fialho, M. C. Q., Matta, S. L. P. (2017) Cadmium-induced testicular damage is associated with mineral imbalance, increased antioxidant enzymes activity and protein oxidation in rats. *Life Sciences*, **175**, 23-30, <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2017.03.007>
- Dey, P., Malik, A., Mishra, A., Singh, D. K., Bergen, M., Jehmlich, N. (2020) Mechanistic insight to mycoremediation potential of a metal resistant fungal strain for removal of hazardous metals from multimetal pesticide matrix. *Environmental Pollution*, **262**, 114255, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114255>
- Dey, P., Gola, D., Mishra, A., Malik, A., Kumar, P., Singh, D. K., Patel, N., Bergen, M., Jehmlich, N. (2016). Comparative performance evaluation of multi-metal resistant fungal strains for simultaneous removal of multiple hazardous metals. *Journal of Hazardous Materials*, **318**, 679-685, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.025>
- Dixit, R., Wasiullah, D., Malaviya, K., Pandiyan, U., Singh, A., Sahu, R., Shukla, B., Singh, J., Rai, P., Sharma, H., Paul Lade, D. (2015) Bioremediation of Heavy Metals from Soil and Aquatic Environment: An Overview of Principles and Criteria of Fundamental Processes. *Sustainability*, **7**, 2189-2212, <https://doi.org/10.3390/su7022189>

- Do, D. D. (1998) Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics. Imperial College, London, 111 pp.
- Duruibe, J. O., Ogwuegbu, M. O. C., Egwurugwu, J. N. (2007) Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*, **2**(5), 112-118, disponível em: https://academicjournals.org/article/article1380209337_Duruibe%20et%20al.pdf
- Ekperusi, O. A., Aigbodion, I. F. (2015) Bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons in diesel contaminated soil with the earthworm: *Eudrilus eugeniae*. *Ekperusi and Aigbodion SpringerPlus*, **4**, 540-553, <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1328-5>
- Enayatizamir, N., Liu, J., Wang, L., Lin, X., Fu, P. (2020) Coupling Laccase production from *Trametes pubescence* with heavy metal removal for Economic Waste Water Treatment, *Journal of Water Process Engineering*, **37**, 101357, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101357>
- Esmaili, A., Beni, A.A. (2015a) Biosorption of nickel and cobalt from plant effluent by *Sargassum glaucescens* nanoparticles at new membrane reactor. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, **12**(6), 2055-2064, <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0744-3>
- Esmaili, A., Beni, A.A. (2015b) Novel membrane reactor design for heavy-metal removal by alginate nanoparticles. *J. Ind. Eng. Chem.*, **26**, 122-128, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.11.023>
- Ezzouhri, L., Castro, E., Moya, M., Espinola, F., Lairini, K. (2009) Heavy metal tolerance of filamentous fungi isolated from polluted sites in Tangier, Morocco. *Afr. J. Microbiol. Res.*, **3**, 035-048, disponível em: https://academicjournals.org/article/article1380177143_Ezzouhri%20et%20al.pdf
- Filippini, T., Tancredi, S., Malagoli, C., Cilloni, S., Malavolti, M., Violi, F., Vescovi, L., Bargellini, A., Vinceti, M. (2019) Aluminum and tin: Food contamination and dietary intake in an Italian population, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, **52**, 293-301, <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.01.012>
- Freire, R. S., Pelegrini, R., Kubota, L. T., Durán, N., Peralta-Zamora, P. (2000) Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. *Química Nova*, **23**(4), 504-511, <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000400013>
- García-Rosales, G., Olguin, M. T., Colín-Cruz, A., Romero-Guzmán, E. T. (2012) Effect of the pH and temperature on the biosorption of lead(II) and cadmium(II) by sodium-modified stalk sponge of *Zea mays*. *Environ Sci Pollut Res.*, **19**, 177-185, <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0537-x>
- Gaylarde, C. C., Bellinaso, M. L., Manfio, G. P. (2005) Biorremediação: Aspectos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. *Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento*, **34**, 36-43, disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4144372/mod_resource/content/1/Biorremediação%20-%20Artigo%201.pdf
- Gönen, F., Aksu, Z. (2009) Single and binary dye and heavy metal bioaccumulation properties of *Candida tropicalis*: use of response surface methodology (RSM) for the estimation of removal yields. *Journal of Hazardous Materials*, **172**, 1512-1519, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.021>
- Gopi, D., Nithiya, S., Shinyjoy, E., Rajeswari, D., Kavitha, L. (2019) Carbon nanotubes/carboxymethyl chitosan/mineralized hydroxyapatite composite coating on Ti-6Al-4V alloy for improved mechanical and biological properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **58**(2), 18474-18475, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b04600>
- Hlihor, R. M., Figueiredo, H., Tavares, T., Gavrilescu, M. (2017) Biosorption potential of dead and living *Arthrobacter viscosus* biomass in the removal of Cr(VI): batch and column studies *Process Saf. Environ. Prot.*, **108**, 44-56, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.016>
- Hou, S., Wu, B., Peng, D., Wang, Z., Wang, Y., Xu, H. (2019) Remediation performance and mechanism of hexavalent chromium in alkaline soil using multi-layer loaded nano-zero-valent iron. *Environmental Pollution*, **252**, part A, 553-561, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.083>
- Huang, Q., Hu, D., Chen, M., Bao, C., Jin, X. (2019) Sequential removal of aniline and heavy metal ions by jute biosorbents: A practical design of modifying adsorbent with reactive adsorbate. *Journal of Molecular Liquids*, **285**, 288-298, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.04.115>
- Iskandar, N. L., Zainudin, N. A., Tan, S. G. (2011) Tolerance and biosorption of copper (Cu) and lead (Pb) by filamentous fungi isolated from a freshwater ecosystem. *Journal of Environmental Sciences*, **23**(5), 824-830, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60475-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60475-5)

- Igiri, B. E., Okoduwa, S. I., Idoko, G. O., Akabuogu, E. P., Adeyi, A. O., Ejiogu, I. K. (2018) Toxicity and bioremediation of heavy metals contaminated ecosystem from tannery wastewater: a review. *J. Toxicol.*, **2018**, 1–16, <https://doi.org/10.1155/2018/2568038>
- Karthik, C., Ramkumar, V. S., Pugazhendhi, A., Gopalakrishnan, K., Arulselvi, P. I. (2017) Biosorption and biotransformation of Cr(VI) by novel Cellulosimicrobium funkei strain AR6. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **70**, 282-290, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.11.006>
- Kavita, B., Keharia, H. (2012) Biosorption potential of Trichoderma gamsii biomass for removal of Cr(VI) from electroplating industrial effluente. *Int. J. Chem. Eng.*, **2012**, 1-12, <https://doi.org/10.1155/2012/305462>
- Khaled, A., Nemr, A. E., El-Sikaily, A., Abdelwahab, O. (2009) Treatment of artificial textile dye effluent containing direct yellow 12 orange peel carbon. *Desalination*, **238**, 210-232, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.02.014>
- Khan, I., Aftab, M., Shakir, S., Ali, M., Qayyum, S., Rehman, M. U., Haleem, K. S., Touseef, I. (2019). Mycoremediation of heavy metal (Cd and Cr)–polluted soil through indigenous metallotolerant fungal isolates. *Environ Monit Assess*, **191**, 585, <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7769-5>
- Kumar, V., Dwivedi, S. K. (2020) Multimetal tolerant fungus Aspergillus flavus CR500 with remarkable stress response, simultaneous multiple metal/lloid removal ability and bioremediation potential of wastewater, *Environmental Technology & Innovation*, **20**, 101075, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101075>
- Kushwaha, S., Sreedhar, B., Bhatt, R., Sudhakar, P. P. (2015) Spectroscopic characterization for remediation of copper, cadmium and mercury using modified palm shell powder. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **46**(1) 191-199, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.09.018>
- Lakard, S., Magnenet, C., Mokhter, M., Euvrard, M., Buron, C., Lakard, B. (2015) Retention of Cu (II) and Ni (II) ions by filtration through polymer-modified membranes. *Separation and Purification Technology*, **149**, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.028>
- Latif, A., Sheng, D., Sun, K., Si, Y., Azeem, M., Abbas, A., Bilal, M. (2020) Remediation of heavy metals polluted environment using Fe-based nanoparticles: Mechanisms, influencing factors, and environmental implications. *Environmental Pollution*, **264**, 114728, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114728>
- Lei, J., Guo, Q., Yao, W., Duan, T. Chen, P., Zhu, W. (2018) Bioconcentration of organic dyes via fungal hyphae and their derived carbon fibers for supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry*, **6**(23), 10710-10717, <https://doi.org/10.1039/C8TA02655F>
- Leite, M. A. (2002). Análise do aporte, da taxa de sedimentação e da concentração de metais na água, plâncton e sedimento do reservatório de Salto Grande, Americana - SP. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-14032003-144635/pt-br.php>
- Leng, Y., Li, Y., Wen, Y., Zhao, H., Wang, O., Li, S.-W. (2020) Transcriptome analysis provides molecular evidences for growth and adaptation of plant roots in cadmium-contaminated environments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **204**, 111098, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111098>
- Levinskaite, L. (2002) Response of soil fungi to chromium VI. *Ekologija*, **1**, 10-13, disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267939909_Response_of_soil_fungi_to_chromiumVI
- Li, D., Xu, X., Yu, H., Han, X. (2017) Characterization of pb2+ biosorption by psychrotrophic strain Pseudomonas sp. I3 isolated from permafrost soil of Mohe wetland in Northeast China. *J. Environ. Manag.*, **196**, 8-15, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.076>
- Li, F., Wang, W., Li, C., Zhu, R., Ge, F., Zheng, Y., Tang, Y. (2018) Self-mediated pH changes in culture medium affecting biosorption and biomineralization of Cd2+ by Bacillus cereus Cd01 J. *Hazard. Mater.*, **358**, 178-186, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.066>
- Li, et al. (2019) Integration of bio-inspired adsorption and photodegradation for the treatment of organics-containing radioactive wastewater. *Chemical Engineering Journal*, **364**, 139-145, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.169>
- Lima, D. F., Oliveira, O. M. C., Cruz, M. J. M. (2011) Utilização dos fungos na biorremediação de substratos contaminados por petróleo: estado da arte. *Cadernos de Geociências*, **8**(2), 113-121, disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/5553>

- Lima, D. P., Santos, C., Silva, R. S., Yoshioka, E. T. O., Bezerra, R. M. (2015) Contaminação por metais pesados em peixes e água da bacia do rio Cassiporé, Estado do Amapá, Brasil. *Chemistry - Acta Amaz.*, **45**(4), 405-414, <https://doi.org/10.1590/1809-4392201403995>
- Lingamdinne, L. P., Chang, Y.-Y., Yang, J.-K., Singh, J., Choi, E.-H., Shiratani, M., Koduru, J.R., Attri, P. (2017) Biogenic reductive preparation of magnetic inverse spinel iron oxide nanoparticles for the adsorption removal of heavy metals. *Chem. Eng. J.*, **307**, 74-84, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.067>
- Liu, C., Ngo, H. H., Guo, W. (2012) Watermelon rind: agro-waste or superior biosorbent? *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **167**(6), 1699-1715, <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9521-7>
- Lu, N., Hu, T., Zhai, Y., Qin, H., Aliyeva, J., Zhang, H. (2020) Fungal cell with artificial metal container for heavy metals biosorption: Equilibrium, kinetics study and mechanisms analysis. *Environmental Research*, **182**, 109061, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109061>
- Mahapatra, B., Dhal, N. K., Pradhan, A., Panda, B. P. (2020) Application of bacterial extracellular polymeric substances for detoxification of heavy metals from contaminated environment: A mini-review. *Materials Today: Proceedings*, **30**(2), 283-288, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.490>
- Mariana, M., Abdul Khalil, H.P.S., Mistar, E. M., Yahya, E. B., Danish, T. A. M., Amayreh, M. (2021) Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, **43**, 102221, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102221>
- Módenes, A. N., Espinoza-Quifiones, F. R., Lavarda, F. L., Colombo, A., Borba, C. E., Leichtweis, W. A., Mora, N. D. (2013) Remoção dos metais pesados Cd (II), Cu (II) e Zn (II) pelo processo de biossorção utilizando a macrófita *Eicchornia crassipes*. Rem: *Revista Escola de Minas*, **66**(3), 355-362, <https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000300013>
- Mahapatra, S., Banerjee, D. (2013) Fungal exopolysaccharide: production and applications. *Microbiol. Insights*, **6**, 1-16, <https://doi.org/10.4137/MBI.S10957>
- Moreira, D. R. (2010) *Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia*. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Porto Alegre – RS, 79 pp, disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3158>
- Moreira, F. R., Moreira, J. C. (2004) A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde. *Ciência & Saúde Coletiva*, **9**(1), 167-181, <https://doi.org/10.1590/S1413-81232004000100017>
- Mulligan, C. N., Yong, R. N., Gibbs, B. F. (2001) Heavy metal removal from sediments by biosurfactants. *J. Hazard. Mater.*, **85**, 111-125, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00224-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00224-2)
- Murphy, R. J., Levy, J. F. (1983) Production of copper oxalate by some copper tolerant fungi. *Transactions of the British Mycological Society*, **81**, 165-168, [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(83\)80223-X](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(83)80223-X)
- Musarurwa, H., Tavengwa, N. T. (2020) Application of carboxymethyl polysaccharides as bio-sorbents for the sequestration of heavy metals in aquatic environments. *Carbohydrate Polymers*, **237**(1), 116-142, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116142>
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., Sreekanth, T. V. M. (2010) Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemical Letters*, **8**, 199-216, <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
- Néri, T. S. (2014) *Desenvolvimento de um método para determinação de Sb(III) e Sb total em amostras de interesse ambiental utilizando geração de hidretos acoplada à espectrometria de absorção atômica com chama*. Dissertação (Mestrado em Química pela Universidade Federal de Uberlândia) – Uberlândia, 98 pp, disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/17403>
- Nouri, J., Khorasani, N., Lorestani, B., Karami, N., Hassani, A. H., Yousefi, N. (2009) Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Environmental Earth Science*, **59**, 315-323, <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0028-2>
- Oghenejoboh, K. (2018) Biosorption of nickel (II) ion from synthetic wastewater on watermelon rind activated carbon using response surface methodology (RSM) optimization approach. *Niger. J. Technol.*, **37**, 647-655, <https://doi.org/10.4314/njt.v37i3.13>
- Oh, J. J., Kim, J. Y., Kim, Y. J., Kim, S., Kim, G. H. (2021) Utilization of extracellular fungal melanin as an eco-friendly biosorbent for treatment of metal-contaminated effluents. *Chemosphere*, **272**, 129884, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129884>

- Pal, D., Maiti, S. K. (2020) An approach to counter sediment toxicity by immobilization of heavy metals using waste fish scale derived biosorbent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **187**, 1098033, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109833>
- Palodkar, A. V., Anupam, K., Banerjee, S., Halder, G. (2017) Insight into preparation of activated carbon towards defluoridation of waste water: optimization, kinetics, equilibrium, and cost estimation. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **36**(6), 1597-1611, <https://doi.org/10.1002/ep.12613>
- Paria, K., Pyne, S., Chakraborty, S. K. (2022) Optimization of heavy metal (lead) remedial activities of fungi *Aspergillus penicillioides* (F12) through extra cellular polymeric substances, *Chemosphere*, **286**(3), 131-874, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131874>
- Passos, C. T., Burkert, J. F. M., Kalil, S. J., Bukert, C. A. V. (2009) Biodegradação de fenol por uma nova linhagem de *Aspergillus* sp. isolada de um solo contaminado do sul do Brasil. *Química Nova*, **32**(4), 950-954, disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/1842>
- Peixoto, S., Henriques, I., Loureiro, S. (2021) Efeitos de longo prazo da exposição a nanopesticidas de Cu (OH)₂ nas comunidades microbianas do solo. *Cerca de. Pollut.*, **269**, 116113, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116113>
- Pino, G. A. H. (2005) *Biossorção de metais pesados utilizando pó da casca de coco verde (cocos nucifera)*. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 113 pp, <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.7596>
- Priyadarshini, E., Priyadarshini, S. S., Primos, B. G., Pradhan, N. (2021) Metal-Fungus interaction: Review on cellular processes underlying heavy metal detoxification and synthesis of metal nanoparticles. *Chemosphere*, **274**, 129976, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129976>
- Ramya, D., Kiruba, N. J. M., Thatheyus, A. J. (2021) Biosorption of heavy metals using fungal biosorbents – A review. In: *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-technology*, **2**, 331 – 352, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821925-6.00015-0>
- Ramos, T. D. (2013) *Avaliação da exposição ambiental ao manganês na população residente no entorno de um estaleiro no município de Angra dos Reis, RJ*. Dissertação de Mestrado para obtenção do título de Mestre em Ciências na área de Saúde Pública. Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ). Rio de Janeiro, 107 pp, disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/24556>
- Rodriguez-Freire, L, Gonzalez-Estrellab, J. Lic, G. (2019) Technologies for Fractionation of Wastewater and Resource Recovery. *Wastewater Treatment Residues as Resources for Biorefinery Products and Biofuels*, 329-354, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816204-0.00015-1>
- Ruthven, D. M. (1984) *Principles of Adsorption and Adsorption Process*. New York: Editora John Wiley&Sons. 431 pp.
- Saha, G. C., Hoque, M. I. U., Miah, M. A. M., Holze, R., Chowdhury, D. A., Khandaker, S., Chowdhury, S. (2017) Biosorptive removal of lead from aqueous solutions onto Taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) as a low cost bioadsorbent: Characterization, equilibria, kinetics and biosorption-mechanism studies. *J. Environ. Chem. Eng.*, **5**(3), 2151-2162, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.013>
- Sanyal, P., Chakraborty, S. K., Ghosh, P. B. (2015) Phytoremediation of sewage-fed wetlands of East-Kolkata, India: a case study. *Int. Res. J. Environ. Sci.*, **4**(1), 80-89, disponível em: <http://www.isca.in/IJENS/Archive/v4/i1/14.ISCA-IRJEvS-2014-247.pdf>
- Saravanan, A., Karishma, S., Kumar, P. S., Varjani, S., Yaashikaa, P. R., Jeevanantham, S., Ramamurthy, R., Reshma, B. (2021) Simultaneous removal of Cu(II) and reactive green 6 dye from wastewater using immobilized mixed fungal biomass and its recovery, *Chemosphere*, **271**, 129519, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129519>
- Selvi, K., Pattabhi, S., Kardivelu, K. (2001) Removal of Cr (VI) from aqueous solution by adsorption onto activated carbon. *Bioresource Technology*, **80**, 87-89, [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00068-2)
- Shan, R., Shi, Y., Gu, J., Wang, Y., Yuan, H. (2020) Single and competitive adsorption affinity of heavy metals toward peanut shell-derived biochar and its mechanisms in aqueous systems. *Chin. J. Chem. Eng.* **28**, 1375–1383, <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.02.012>
- Sheikh, Z., Amin, M., Khan, N., Khan, M. N., Sami, S. K., Khan, S. B., Hafeez, I., Khan, S. A., Bakhsh, E. M., Cheng, C. K. (2021) Potential application of *Allium Cepa* seeds as a novel biosorbent for efficient biosorption of heavy metals ions from aqueous solution. *Chemosphere*, **279**, 130545, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130545>

- Shi, L., Wei, D., Ngo, H. H., Guo, W., Du, B., Wei, Q. (2015) Application of anaerobic granular sludge for competitive biosorption of methylene blue and Pb(II): fluorescence and response surface methodology. *Bioresour. Technol.*, **194**, 297-304, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.029>
- Silva, M. W., Estanislau, C. A. M. (2015) Concentração de mercúrio em peixes da Amazônia. *Boletim ABLimno*, **41**(1), 08-14, disponível em: <https://silo.tips/download/concentraao-de-mercurio-em-peixes-da-amazonia>
- Silver, S., Phung, L. T. (2005) A bacterial view of the periodic table: genes and proteins for toxic inorganic ions. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, **32**(11-12), 587-605, <https://doi.org/10.1007/s10295-005-0019-6>
- Simonescu, C. M., Ferdeş, M. (2012) Fungal biomass for Cu(II) uptake from aqueous systems. *Pol. J. Environ. Stud.*, **21**, 1831-1839, disponível em: <http://www.pjoes.com/Fungal-Biomass-for-Cu-II-Uptake-r-nfrom-Aqueous-Systems,88934,0,2.html>
- Sobol, Z., Schiestl, R. H. (2012) Intracellular and extracellular factors influencing Cr(VI) and Cr(III) genotoxicity. *Environ. Mol. Mutagen.*, **53**, 94-100, <https://doi.org/10.1002/em.20679>
- Song, Q., Wang, C., Zhang, Z., Gao, J. (2014) Adsorption of Cu(II) and Ni(II) using a novel xanthated carboxymethyl chitosan. *Separation Science and Technology*, **49**(8), 1235-1243, <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.872656>
- Talukdar, D., Jasrotia, T., (2020) Sharma, R., Jaglan, S., Kumar, R., Vats, R., Kumar, R., Mahnashi, M. H., Umar, A. Evaluation of novel indigenous fungal consortium for enhanced bioremediation of heavy metals from contaminated sites. *Environmental Technology & Innovation*, **20**, 101050, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101050>
- Teixeira, Dhessyca Caroline Luna et al. (2020) Exposição a contaminantes ambientais inorgânicos e danos à saúde humana. *Brazilian Journal of Health Review*, **3**(4), 10353-10369, <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n4-256>
- Vale, M. Do Socorro. (2010) *Remoção de cromo e zinco por Aspergillus niger*. Tese (Doutorado em Saneamento pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – UFC) – Fortaleza, 138 pp, disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/17085>
- Valix, M., Loon, L. O. (2003) Adaptive tolerance behaviour of fungi in heavy metals. *Minerals Engineering*, **16**, 193-198, [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00004-9)
- Volesky, B. (2003) Biosorption process simulation tools. *Hydrometallurgy*, **71**(1), 179-190, [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00155-5](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00155-5)
- Volesky, B. (2001) Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*, **59**, 203-216, [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00160-2)
- Wang, R., Fan, X. W., Li, Y. Z. (2022) Efficient removal of a low concentration of Pb(II), Fe(III) and Cu(II) from simulated drinking water by co-immobilization between low-dosages of metal-resistant/adapted fungus *Penicillium janthinillum* and graphene oxide and activated carbon. *Chemosphere*, **286**, 131591, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131591>
- Wang, T., Sun, H. (2013) Biosorção de metais pesados de solução aquosa por *Bacillus subtilis* mutante de UV. *Environ Sci Pollut Res Int*, **20**, 7450-7463, <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1767-x>
- Wang, Y., Yi, B., Sun, X., Yu, L., Wu, L., Liu, W., Wang, D., Li, Y., Jia, R., Yu, H., Li, X. (2019) Removal and tolerance mechanism of Pb by a filamentous fungus: A case study. *Chemosphere*, **225**, 200-208, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.027>
- Wu, M. D. J., Ying, T., Shen, Z., Wang, H. (2014) Effect of low-level prenatal mercury exposure on neonate neurobehavioral development in China. *Pediatric Neurology*, **51**(1), 93-99, <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2014.03.018>
- Wu, Y., Guan, C. Y., Griswold, N., Hou, L., Fang, X., Hu, A., Hu, Z., Yu, C. (2020) Zero-valent iron-based technologies for removal of heavy metal(loid)s and organic pollutants from the aquatic environment: Recent advances and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, **277**(20), 123478, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123478>
- Wu, Y., Pang, H., Liu, Y., Wang, X., Yu, S., Fu, D., Chen, J., Wang, X. (2019) Environmental remediation of heavy metal ions by novel-nanomaterials: a review. *Environ. Pollut.*, **246**, 608-620, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.12.076>

- Xiang, L., Liu, P.-H., Jiang, X.-F., Con, P.-J. (2019) Health risk assessment and spatial distribution characteristics of heavy metal pollution in rice samples from a surrounding hydrometallurgy plant area in No. 721 uranium mining, East China. *J. Geochem. Explor.*, **207**, 106360, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106360>
- Xiao, Y., He, M., Xie, J., Liu, L., Zhang, X. (2021) Effects of heavy metals and organic matter fractions on the fungal communities in mangrove sediments from Techeng Isle, South China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **222**, 112545, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112545>
- Xiao, Z., Zhou, W., Zhang, Y. (2020) Fungal polysaccharides. *Adv. Pharmacol.*, **87**, 277-299, <https://doi.org/10.1016/bs.apha.2019.08.003>
- Yu, H., Pang, J., Ai, T., Liu, L. (2016) Biosorption of Cu²⁺ Co²⁺ and Ni²⁺ from aqueous solution by modified corn silk: Equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **62**, 21-30, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.01.026>
- Zhang, D., Yin, C., Abbas, N., Mao, Z., Zhang, Y. (2020) Multiple heavy metal tolerance and removal by an earthworm gut fungus *Trichoderma brevicompactum* QYCD-6, *Sci Rep* **10**, 6940, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63813-y>
- Zheng, H., Li, J. L., Li, H. H., Hu, G. C., Li, H. S. (2014) Analysis of trace metals and perfluorinated compounds in 43 representative tea products from South China. *Journal of food science*, **79**(6), C1123-C1129, <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12470>